

# 自保护药芯焊丝激光-电弧复合堆焊参数对熔滴过渡的影响

刘西洋<sup>1,2\*\*</sup>, 孙凤莲<sup>1\*</sup>, 王君宇<sup>2</sup>, 赵御民<sup>2</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨理工大学材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

<sup>2</sup>哈尔滨焊接研究院有限公司研发中心, 黑龙江 哈尔滨 150028

**摘要** 研究了自保护药芯焊丝激光-电弧复合堆焊的熔滴过渡行为。结果表明,激光的加入明显减小了电弧斑点的漂移概率,拉伸了电弧空间,改变了熔滴受力状态及其过渡行为。激光前置比后置时更有利于熔滴过渡和电弧稳定性的提高。自保护药芯焊丝激光-电弧复合堆焊的最佳工艺参数为:激光前置,激光功率 2 kW,光丝间距 +4 mm,光斑直径为 2 mm,光丝夹角 30°。当光丝间距小且激光功率为 4 kW 时,熔滴过渡形式由排斥过渡变为爆炸过渡。

**关键词** 激光技术; 激光-电弧复合堆焊; 熔滴过渡; 自保护药芯焊丝; 工艺参数

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0802007

## Influences of Laser-Arc Hybrid Surfacing Parameters with Self-Shielded Flux-Cored Wire on Droplet Transition

Liu Xiyang<sup>1,2\*\*</sup>, Sun Fenglian<sup>1\*</sup>, Wang Junyu<sup>2</sup>, Zhao Yumin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Material Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

<sup>2</sup>Research and Development Center, Harbin Welding Institute Limited Company, Harbin, Heilongjiang 150028, China

**Abstract** The droplet transition behavior of laser-arc hybrid surfacing with self-shielded flux-cored wire is studied. The results show that the introduction of laser makes the arc wandering probability significantly reduced, arc space stretched, droplet stress state and transition behavior changed. Laser preposition is more beneficial to droplet transfer and arc stability improvement than laser postposition. The optimal process parameters of laser-arc hybrid surfacing with self-shielded flux-cored wire are laser preposition, laser power of 2 kW, laser-arc distance of +4 mm, light spot diameter of 2 mm and laser-arc angle of 30°. When laser-arc distance is small and laser power is 4 kW, the droplet transition mode is changed from repelled transfer to explosive transfer.

**Key words** laser technique; laser-arc hybrid surfacing; droplet transition; self-shielded flux-cored wire; technological parameters

**OCIS codes** 140.3390; 140.3510; 160.3900; 350.3850

## 1 引 言

堆焊过程中,熔滴过渡行为对堆焊的工艺性能和质量具有重要影响<sup>[1]</sup>。国内外学者利用电弧分析仪和高速摄像技术,对自保护药芯焊丝电弧焊接和实心焊丝激光-电弧复合焊接的熔滴过渡行为开展了大量研究。张天理等<sup>[2]</sup>认为自保护药芯焊丝焊接

时,电流变异系数比标准差更能准确地反映电弧的稳定性。栗卓新等<sup>[3]</sup>认为,电流、电压主要影响作用在熔滴上的电弧力,从而对熔滴过渡的形式和时间产生影响。张曙红等<sup>[4]</sup>认为,自保护药芯焊丝独特的焊丝结构和药芯成分形成了电弧在滞熔渣柱周围环绕旋转的现象,破坏了电弧的稳定性。孙咸等<sup>[5]</sup>针对典型钛型渣系药芯焊丝提出了改善熔滴过渡特

收稿日期: 2018-02-09; 修回日期: 2018-03-13; 录用日期: 2018-04-12

基金项目: 三明市指导性科技项目(2017-G-29)、机械科学研究总院技术发展基金(20170722)

\* E-mail: sunflian@163.com; \*\* E-mail: 2004liuxiyang@163.com

性的新观点,即控制熔滴尺寸是必要条件,控制熔滴大角度的过渡次数和过渡均匀性等是充分条件。Lorenz 等<sup>[6-7]</sup>进行了激光-气体保护电弧(GMA)复合焊接实芯焊丝和药芯焊丝的对比,提出了药芯焊丝将会为激光-电弧复合焊接提供新选择的观点,并展望了其在激光-电弧复合焊接中的前景。吴艳明等<sup>[8-9]</sup>认为,激光的加入改变了熔滴的空间飞行轨迹、过渡稳定性和过渡模式,提高了熔化极活性气体保护焊(MAG)电弧过程的稳定性,改善了焊道的铺展性。丁雪萍等<sup>[10]</sup>发现,激光+双丝脉冲 MAG 复合焊时,加入激光可稳定电弧、细化熔滴、促进熔滴过渡、提高焊接的稳定性。刘凤德等<sup>[11]</sup>认为,激光的加入改变了电弧和熔池形态,降低了熔滴过渡频率和过渡稳定性。张晓峰等<sup>[12-13]</sup>认为,等离子流力竖直向下的分力减小是导致熔滴尺寸增大、过渡频率降低的主要原因。徐春鹰等<sup>[14]</sup>认为,激光的加入主要改变了电弧形态,进而改变了熔滴上下表面的压力差,使得熔滴在接近熔池表面发生合并且过渡的频率减慢。牛宽等<sup>[15-16]</sup>认为,激光能量决定了熔滴的尺寸与过渡频率,电弧能量决定了熔滴过渡的模式。胡连海等<sup>[17]</sup>认为,在激光-双熔化极稀有气体保护(MIG)复合焊过程中,当工艺参数不合适时,电弧会发生弯曲,进而导致不稳定的大颗粒过渡和短路过渡;当工艺参数合适时,两个电弧根部被固定在激光光致等离子体的下部,形成稳定的射流过渡。何双等<sup>[18]</sup>认为,激光-熔化极气体保护(GMAW)复合焊时,随激光功率的增大,金属蒸气的反作用力增大,此时电磁力方向的改变是影响熔滴过渡的主要因素。李敏等<sup>[19]</sup>认为,光纤激光焊接可将纯 Ar 气作为保护气体,脉冲熔化极气体保护焊(GMAW-P)与光纤激光复合后会导致激光等离子体膨胀增大,电弧的弧长变短。

上述研究取得了一定的学术成果,但关于自保护药芯焊丝激光-电弧复合堆焊熔滴过渡的研究鲜有报道。自保护药芯焊丝激光-电弧复合堆焊时,由于激光和焊丝药芯成分的介入,能量密度高,造气和造渣物质增多,电流密度较大,使得熔滴受到的表面张力、电磁收缩力、斑点压力、等离子流力、气体动力发生了改变,进而对熔滴过渡行为产生重要影响。本文研究了自保护药芯焊丝激光-电弧复合堆焊的熔滴过渡行为,分析了堆焊参数对熔滴过渡行为的影响规律,研究结论对改善堆焊的工艺性能和提高堆焊质量具有重要的参考价值。

## 2 试验方法

堆焊系统主要包括:额定功率为 6 kW 的连续波光纤激光器,输出波长为  $1.07 \mu\text{m}$ ,聚焦透镜的焦距为 300 mm,焦点直径为 0.6 mm;华远电气设备有限公司 NB-500IGBT 弧焊电源,采用直流反接方法,等速送丝。采集系统主要包括日本 Photron 公司采集频率为 4000 frame/s 的 Fastcam Ultima 512 型高速摄像机与德国汉诺威大学出品的 AHXXII 电弧分析仪。堆焊和采集系统如图 1 所示。

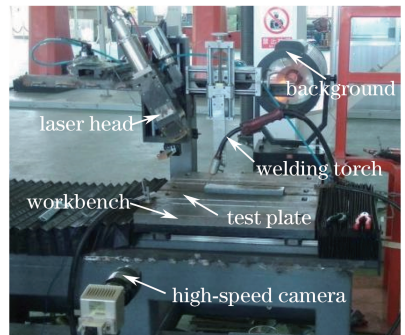


图 1 堆焊和采集系统

Fig. 1 Surfacing and collecting system

试验选用英国 WA 公司生产的 CHROMECORE 414N-O 焊丝,焊丝直径为 1.6 mm,试板选用鞍钢生产的 Q235 钢板,尺寸为  $300 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。依次选取一个堆焊参数作为变量(其他堆焊参数不变),进行堆焊试验,试验方案见表 1。

自保护药芯焊丝主要用于硬面堆焊,其熔深浅、稀释率低,因此分别选用 1, 2, 3 mm 三种激光光斑直径进行试验。

光丝间距  $D_{\text{LA}}$ 用激光光斑中心到焊丝端头与母材表面接触点的距离来表示,定义激光光斑作用在母材上时  $D_{\text{LA}}$ 为正值,激光光斑作用在焊丝上时  $D_{\text{LA}}$ 为负值。激光前置指沿着堆焊方向激光在前焊丝在后,反之为激光后置。光丝夹角是指激光光斑入射方向与焊丝给进方向的夹角,具体参数见表 2。光丝位置和光丝夹角的示意图如图 2 所示。

试验时,通过高速摄像机采集不同堆焊参数下(光斑直径、光丝夹角、光丝位置、激光功率)的熔滴过渡图像,同时利用电弧分析仪记录其电弧电信号,分析原理见文献[20]。

表 1 试验方案

Table 1 Experimental scheme

Experiment No.	Angle between laser and arc $\alpha /(^{\circ})$	Spot diameter $d / \text{mm}$	Distance between laser and arc $D_{LA} / \text{mm}$	Position relation between laser and arc	Laser power $P_L / \text{kW}$	Wire extension length $L / \text{mm}$	Welding voltage $U / \text{V}$	Welding current $I / \text{A}$	Welding speed $v / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$
1	30	1,2,3	0	Laser preposition	2.0	25	26	220	0.6
2	30, 65	2	0	Laser preposition	2.0	25	26	220	0.6
3	30	2	-4, -2, 0, +2, +4, +8	Laser preposition, laser postposition	2.0	25	26	220	0.6
4	30	2	-2, 0, +2,	Laser preposition	1.0, 2.0, 4.0	25	26	220	0.6

表 2 光丝夹角参数表

Table 2 Parameter table of laser-arc angle

Parameter	Arc	Hybrid surfacing	Arc	Hybrid surfacing
Angle between laser incidence direction and normal direction $\theta /(^{\circ})$	-	13	-	13
Angle between wire feed direction and normal direction $\beta /(^{\circ})$	17	17	52	52
Angle between laser and wire $\alpha /(^{\circ})$	-	30	-	65

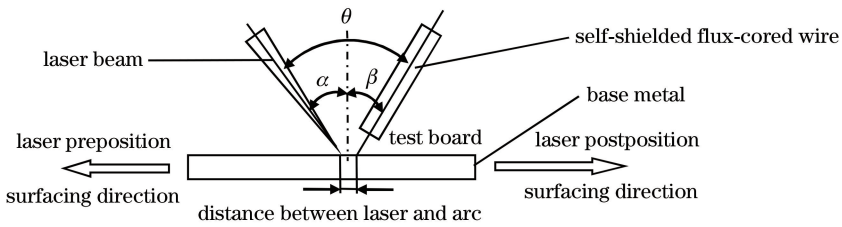


图 2 光丝位置和夹角的示意图

Fig. 2 Schematic of laser-arc position and angle

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 光斑直径对自保护药芯焊丝熔滴过渡的影响

图 3 所示为电弧堆焊和复合堆焊(光斑直径  $d=1, 2, 3 \text{ mm}$ )的电压和电流概率密度的分布图。可见当  $d=1 \text{ mm}$  和  $d=2 \text{ mm}$  时,电压概率密度的分布曲线由双峰结构变为单峰结构,电流概率密度分布集中,无短路过渡特征<sup>[2,20]</sup>。复合堆焊和电弧堆焊熔滴过渡图如图 4 所示。结合图 3 及图 4(a)、(b)发现: $d=1 \text{ mm}$  时,熔滴过渡形式为粗颗粒大角度排斥过渡,熔滴的平均过渡周期为  $100 \text{ ms}$ ;  $d=2 \text{ mm}$  时,熔滴过渡形式为细颗粒大角度排斥过渡,熔滴的平均过渡周期为  $53 \text{ ms}$ 。  $d=3 \text{ mm}$  时,电压概率密度分布曲线的双峰结构更加明显,小驼峰增大,短路时间长,熔滴增大,堆焊过程不稳定,电流概率密度分布更加发散,大电流概率密度分布增多;熔滴过渡形式为大熔滴短路爆炸过渡,熔滴的平均过渡周期为  $80 \text{ ms}$ ,高速摄像

图如图 4(c)所示。激光光斑实际作用在焊丝端头上,正离焦量时,光斑实际的作用直径相对减小。 $d=1 \text{ mm}$  和  $d=2 \text{ mm}$  时,激光的能量密度  $\rho > 10^5 \text{ W/cm}^2$ ,以深熔焊为主,焊丝端头发生全熔熔化,激光对电弧的引导作用增强,同时焊丝端头气化产生的金属和非金属蒸气促进了熔滴过渡; $d=3 \text{ mm}$  时,激光的能量密度  $\rho < 10^5 \text{ W/cm}^2$ ,以热导焊为主,焊丝端头发生半熔熔化,呈现刀尖形态,尖端电流密度较大,易发生电爆炸,不利于堆焊过程的稳定。

电弧堆焊和复合堆焊的电弧电参数见表 3。变异系数是分析数据离散程度的一个重要统计量,表示被检测量的稳定性或一致性<sup>[21]</sup>,电弧电流的变异系数  $k(I)$  可表示为

$$k(I) = \frac{S_d}{\bar{x}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i}, \quad (1)$$

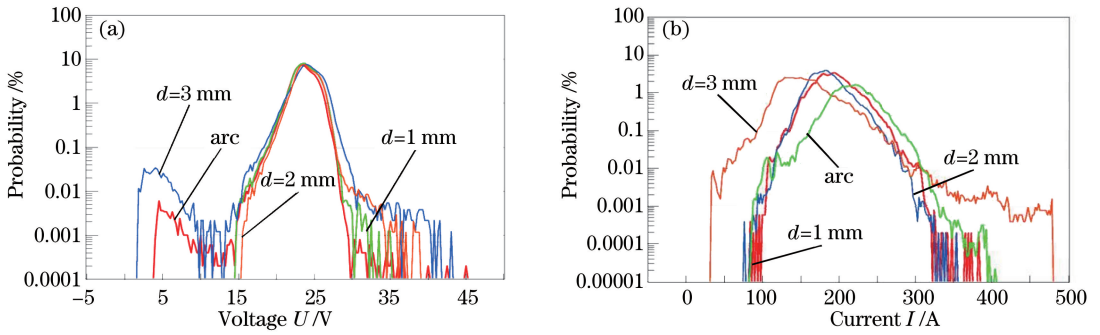


图 3 电弧堆焊和复合堆焊的结果。(a)电压概率密度分布图;(b)电流概率密度分布图

Fig. 3 Results of arc surfacing and hybrid surfacing. (a) Distributions of voltage probability density; (b) distributions of current probability density

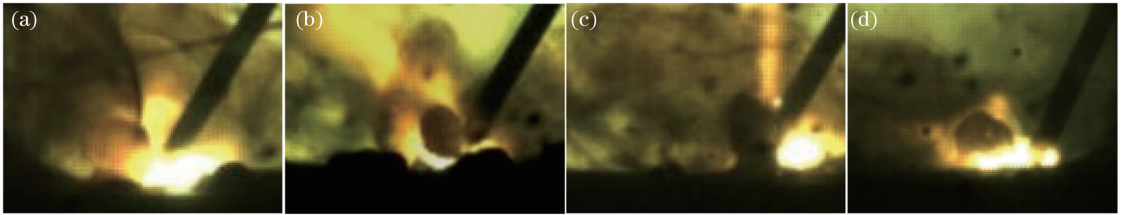


图 4 熔滴图。(a)  $d=1\text{ mm}$ ; (b)  $d=2\text{ mm}$ ; (c)  $d=3\text{ mm}$ ; (d) 电弧堆焊

Fig. 4 Images of droplets. (a)  $d=1\text{ mm}$ ; (b)  $d=2\text{ mm}$ ; (c)  $d=3\text{ mm}$ ; (d) arc surfacing

式中  $S_d$  为标准偏差,  $\bar{x}$  为均值,  $n$  为样本数,  $x_i$  为样本值,  $i$  为样本点编号。

自保护药芯焊丝的电流变异系数可以直观地反映堆焊过程的稳定性<sup>[2,11]</sup>, 因此采用电流变异系数来衡量不同堆焊参数对堆焊过程稳定性的影响

程度。经计算发现:  $d=3\text{ mm}$  时电流变异系数较大, 符合短路过渡特征;  $d=1\text{ mm}$  和  $d=2\text{ mm}$  时, 电流变异系数较小, 符合排斥过渡特征, 其中  $d=2\text{ mm}$  时电流变异系数最小, 表明堆焊过程的稳定性最好。

表 3 电弧堆焊和复合堆焊的电弧电参数

Table 3 Electric arc parameters of arc surfacing and hybrid surfacing

Surfacing heat source mode	Average arc voltage $U / \text{V}$	Standard deviation of arc voltage	Variation coefficient of arc voltage	Average arc current	Standard deviation of arc current	Variation coefficient of arc current	
		$S(U) / \text{V}$	$k(U) / \%$	$I / \text{A}$	$S(I) / \text{A}$	$k(I) / \%$	
Hybrid surfacing	$d=1\text{ mm}$	23.83	1.36	5.69	193.42	25.52	13.20
	$d=2\text{ mm}$	23.94	1.30	5.42	184.45	22.77	12.34
	$d=3\text{ mm}$	24.10	1.72	7.14	156.53	33.84	21.62
Arc surfacing		23.61	1.51	6.39	217.99	29.67	13.61

### 3.2 光丝夹角对自保护药芯焊丝熔滴过渡的影响

图 5、6 所示为光丝夹角  $\alpha=30^\circ$  时不同时刻电弧堆焊和复合堆焊的熔滴过渡图。可以看出, 电弧堆焊时, 电弧弧根的面积小于熔滴的最大截面, 电磁收缩力阻碍熔滴过渡, 电弧弧根在熔滴与焊丝端头之间的跳跃频次较高; 熔滴过渡形式为粗熔滴大角度排斥过渡(熔滴尺寸约为焊丝直径的 4 倍), 熔滴的平均过渡周期为 220 ms, 熔滴尺寸均匀性好。复合堆焊时, 电弧弧根的面积大于熔滴的最大截面, 电

磁收缩力促进熔滴过渡, 熔滴在电弧中过渡, 熔滴温度高, 表面张力减小, 此时熔滴过渡转变为细熔滴颗粒过渡(熔滴尺寸约为焊丝直径的 50%), 熔滴的平均过渡周期为 91 ms, 熔滴尺寸均匀性好。

$\alpha=30^\circ$  时, 熔滴过渡由电弧堆焊的粗熔滴大角度排斥过渡转化为复合堆焊的细熔滴颗粒过渡, 有利于提高堆焊过程的稳定性。电弧堆焊和复合堆焊的电弧电参数见表 4, 可见复合堆焊的电流变异系数相对较小, 与前文观点吻合。

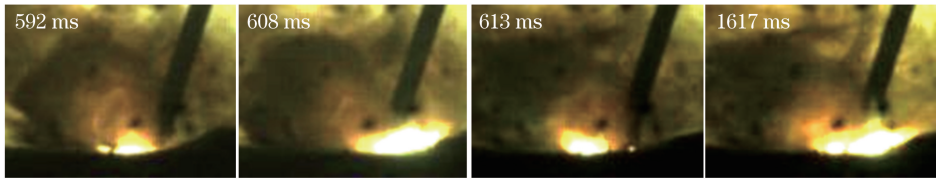


图 5  $\alpha = 30^\circ$ 时电弧堆焊的熔滴过渡图

Fig. 5 Images of droplet transition in arc surfacing when  $\alpha = 30^\circ$

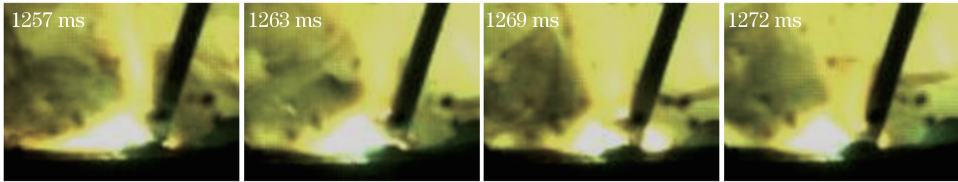


图 6  $\alpha = 30^\circ$ 时复合堆焊的熔滴过渡图

Fig. 6 Images of droplet transition in hybrid surfacing when  $\alpha = 30^\circ$

表 4  $\alpha = 30^\circ$ 时电弧堆焊和复合堆焊的电弧电参数

Table 4 Electric arc parameters of arc surfacing and hybrid surfacing when  $\alpha = 30^\circ$

Surfacing heat source mode	Average arc voltage $U / V$	Standard deviation of arc voltage $S(U) / V$	Variation coefficient of arc voltage $k(U) / \%$	Average arc current $I / A$	Standard deviation of arc current $S(I) / A$	Variation coefficient of arc current $k(I) / \%$
Hybrid surfacing	23.73	1.42	6.00	204.80	25.55	12.47
Arc surfacing	23.40	1.64	7.01	238.55	34.65	14.52

图 7、8 所示为光丝夹角  $\alpha = 65^\circ$  时不同时刻电弧堆焊和复合堆焊的熔滴过渡图。可以看出, 电弧堆焊时, 电弧弧根的面积大于熔滴的最大截面, 电磁收缩力促进熔滴过渡, 此时电磁收缩力在水平方向的分力较大, 受斑点压力和气体动力的影响, 熔滴与焊丝端头呈现 V 字型, 熔滴沿抛物线轨迹过渡; 熔滴过渡形式为小熔滴大角度排斥过渡(熔滴尺寸约为焊丝直径的 1~2 倍), 部分熔滴被推离熔池, 熔滴外部包裹着表面张力较大的熔渣, 不易铺展, 落在母

材上发生二次弹起, 形成大颗粒飞溅并残留在焊道两侧(如图 7 中 1230 ms 时刻所示), 熔滴的平均过渡周期为 66 ms, 熔滴尺寸均匀性差。复合堆焊时, 激光的加入改变了电磁收缩力的大小和方向以及斑点压力的大小, 增大了金属和非金属蒸气的作用力, 此时熔滴过渡仍为小熔滴大角度排斥过渡(熔滴尺寸约为焊丝直径的 2 倍), 但熔滴偏离熔池的距离变小, 形成的颗粒飞溅多分布在近焊道两侧, 熔滴的平均过渡周期为 84 ms, 熔滴尺寸均匀性好。

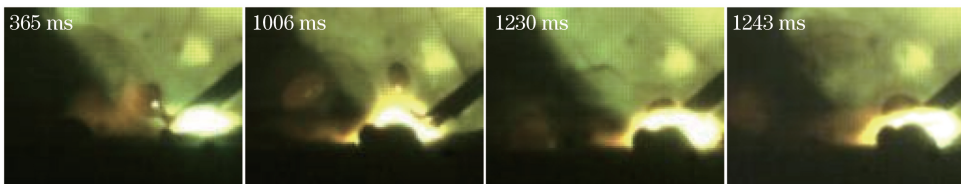


图 7  $\alpha = 65^\circ$ 时电弧堆焊的熔滴过渡图

Fig. 7 Images of droplet transition in arc surfacing when  $\alpha = 65^\circ$

### 3.3 光丝位置对自保护药芯焊丝熔滴过渡的影响

图 9~20 所示为不同光丝位置下不同时刻自保护药芯焊丝激光-电弧复合堆焊的熔滴过渡图。如图 9~11 所示, 激光前置,  $D_{LA} = 0, -2, -4$  mm 时, 激光作用点指向熔敷金属一侧。激光对电弧的吸引作用促使电弧向激光作用点靠近, 根据最小电压原

理, 电弧易偏向熔敷金属一侧。上述两点都提升了电弧作用在熔敷金属一侧的概率, 电弧主要分布在焊丝端头和熔敷金属之间。与电弧堆焊相比, 复合堆焊时的电弧作用点更加稳定, 熔滴过渡周期更短, 熔滴过渡形式为排斥过渡。同时还发现熔滴过渡偏向焊丝端头左侧, 熔池形成位置偏向焊丝端头右侧,

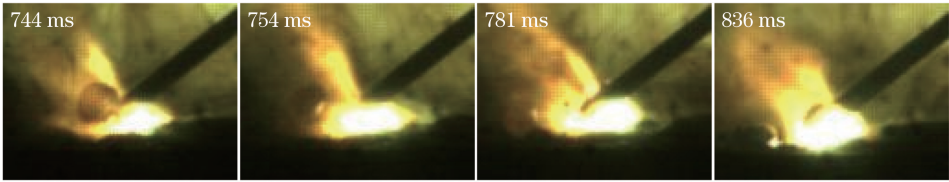


图 8  $\alpha = 65^\circ$  时复合堆焊的熔滴过渡图

Fig. 8 Images of droplet transition in hybrid surfacing when  $\alpha = 65^\circ$

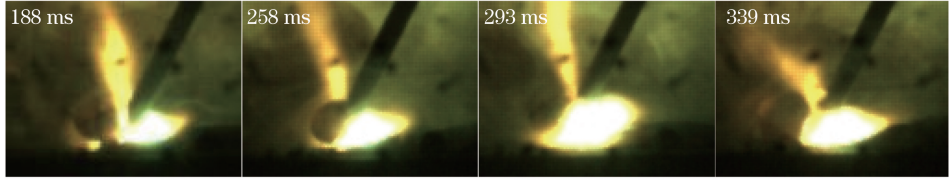


图 9 激光前置且  $D_{LA} = 0$  mm 时的熔滴过渡图

Fig. 9 Images of droplet transition when laser is prepositioned and  $D_{LA} = 0$  mm

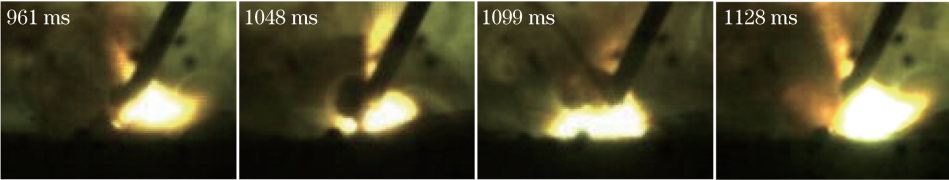


图 10 激光前置且  $D_{LA} = -2$  mm 时的熔滴过渡图

Fig. 10 Images of droplet transition when laser is prepositioned and  $D_{LA} = -2$  mm

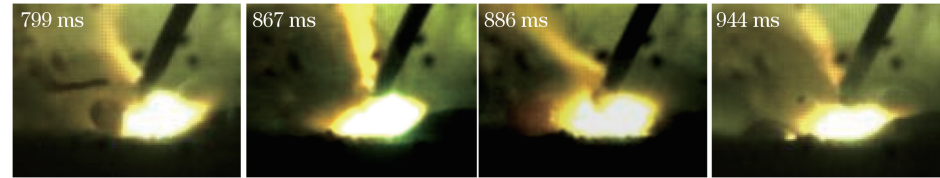


图 11 激光前置且  $D_{LA} = -4$  mm 时的熔滴过渡图

Fig. 11 Images of droplet transition when laser is prepositioned and  $D_{LA} = -4$  mm

熔滴落入熔池外的现象严重,在焊道前方形成金属颗粒,随后被电弧重熔而消失或部分消失。

如图 12~14 所示,激光后置时,激光作用点远离熔敷金属。激光对电弧的吸引作用使电弧偏向激光作用点附近(母材),根据最小电压原理,电弧偏向熔敷金属一侧,故电弧易在熔滴与熔敷金属、焊丝端头与母材、焊丝端头与熔敷金属、熔滴与母材之间跳跃,有时可以形成双弧现象(如图 12 中 596 ms 时刻所示),电弧作用点的漂移现象严重,熔滴受力不稳

定,熔滴过渡形式多样,包含大角度排斥过渡、小角度排斥过渡等。与激光前置不同,熔滴落入熔池中心或近熔敷金属一侧,无二次重熔现象发生。

如图 15~17 所示,激光前置, $D_{LA} = +2, +4, +8$  mm 时,激光作用点远离熔敷金属,激光扩展了熔池面积,延缓了熔池凝固时间,熔滴落入激光熔池与电弧熔池之间,熔滴过渡形式为粗熔滴小角度排斥过渡(熔滴尺寸约为焊丝直径的 4 倍)。 $D_{LA} = +2$  mm、熔滴直径大于 2 mm 时,激光直接作用在

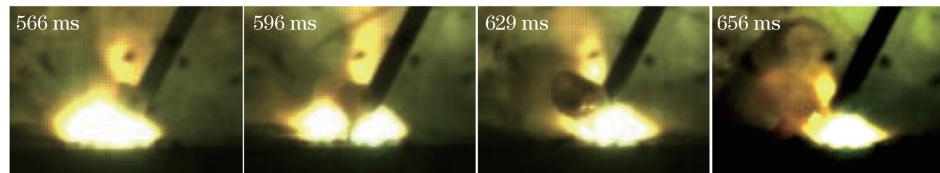


图 12 激光后置且  $D_{LA} = 0$  mm 时的熔滴过渡图

Fig. 12 Images of droplet transition when laser is postpositioned and  $D_{LA} = 0$  mm

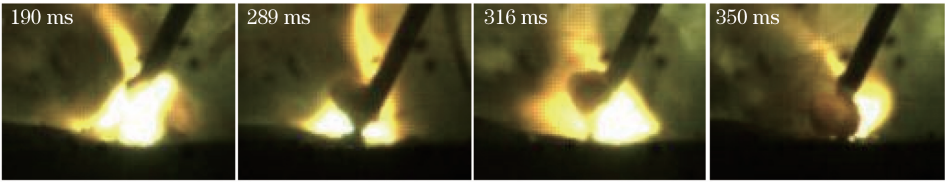


图 13 激光后置且  $D_{LA} = -2$  mm 时的熔滴过渡图

Fig. 13 Images of droplet transition when laser is postpositioned and  $D_{LA} = -2$  mm

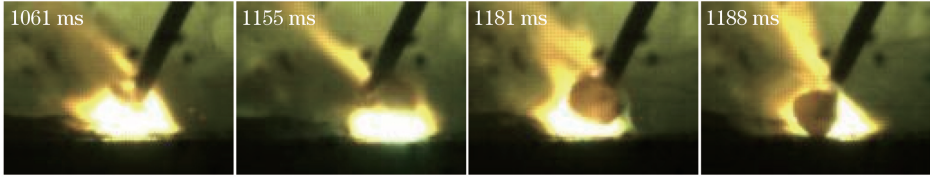


图 14 激光后置且  $D_{LA} = -4$  mm 时的熔滴过渡图

Fig. 14 Images of droplet transition when laser is postpositioned and  $D_{LA} = -4$  mm

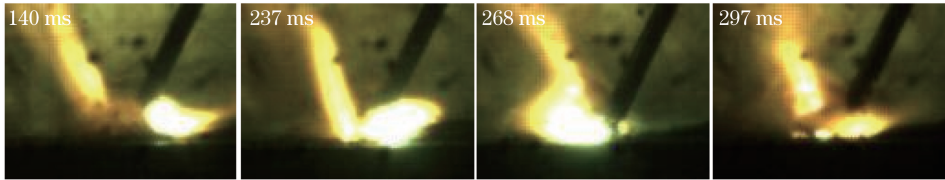


图 15 激光前置且  $D_{LA} = +2$  mm 时的熔滴过渡图

Fig. 15 Images of droplet transition when laser is prepositioned and  $D_{LA} = +2$  mm

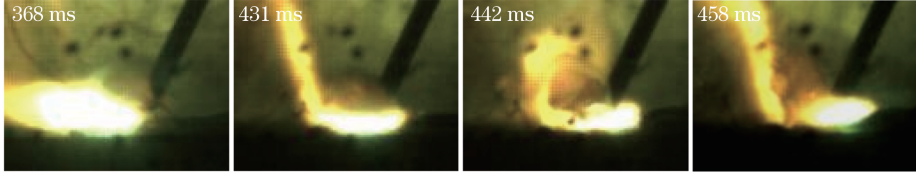


图 16 激光前置且  $D_{LA} = +4$  mm 时的熔滴过渡图

Fig. 16 Images of droplet transition when laser is prepositioned and  $D_{LA} = +4$  mm

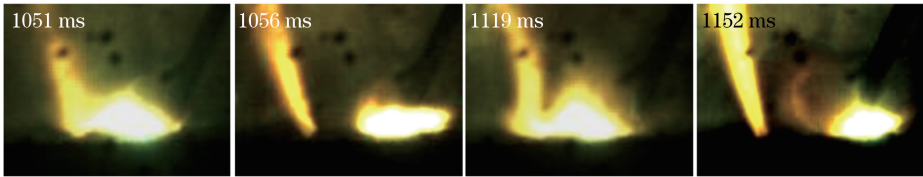


图 17 激光前置且  $D_{LA} = +8$  mm 时的熔滴过渡图

Fig. 17 Images of droplet transition when laser is prepositioned and  $D_{LA} = +8$  mm

熔滴上,产生激光切割熔滴现象,随着光丝间距的增大,切割现象消失,如图 15 中 297 ms 时刻所示。

如图 18~20 所示,激光后置时,激光作用在熔敷金属上,药芯内含有质量分数为 8%~11% 的造渣剂,熔化后形成的氧化盐覆盖在焊道表面,提高了激光能量的利用率,延缓了熔池凝固时间,熔滴落入熔池后端,熔滴过渡形式为粗颗粒小角度排斥过渡,

焊道熔深显著增大。

不同光丝位置的电弧熔滴参数统计表见表 5。可以看出, $D_{LA}$  在 +2~+8 mm 之间时,随着  $D_{LA}$  的增大,电弧偏向激光作用点的时间比例减小,激光对电弧的吸引作用减弱,电弧稳定性下降,母材气化产生的金属蒸气对熔滴过渡的阻碍减小,熔滴过渡频率增大。

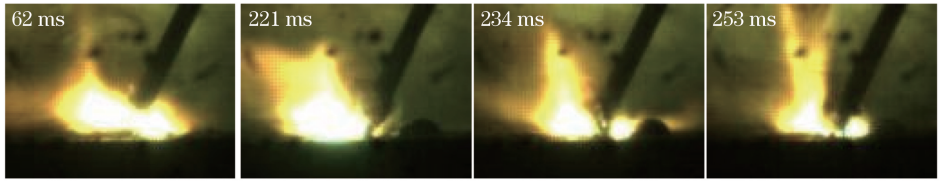


图 18 激光后置且  $D_{LA} = +2$  mm 时的熔滴过渡图

Fig. 18 Images of droplet transition when laser is postpositioned and  $D_{LA} = +2$  mm

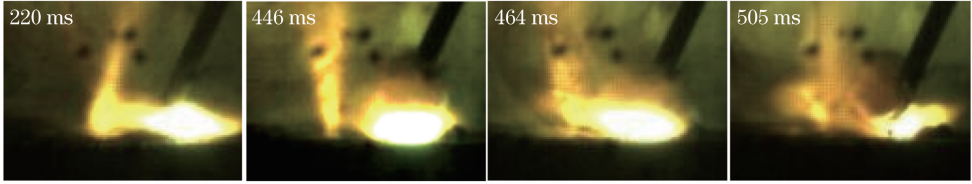


图 19 激光后置且  $D_{LA} = +4$  mm 时的熔滴过渡图

Fig. 19 Images of droplet transition when laser is postpositioned and  $D_{LA} = +4$  mm

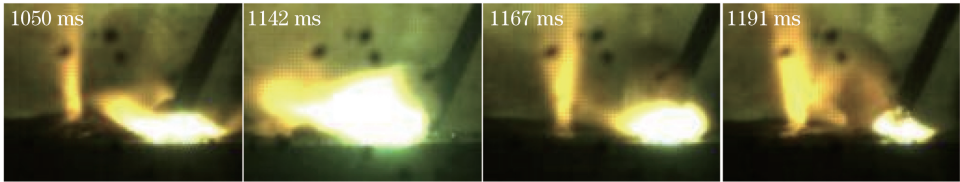


图 20 激光后置且  $D_{LA} = +8$  mm 时的熔滴过渡图

Fig. 20 Images of droplet transition when laser is postpositioned and  $D_{LA} = +8$  mm

表 5 不同光丝位置的电弧熔滴参数

Table 5 Arc droplet parameters at different laser-arc positions

Distance between laser and arc $D_{LA}/\text{mm}$	Position between laser and arc	Total frames of sampling image $F_z/\text{frame}$	Total frames of arc biased toward laser point $F_1/\text{frame}$	Proportion of arc biased toward laser point / %	Number of droplet transitions / counts	Average frame of droplet transition / frame	Average droplet transfer cycle $T/\text{ms}$
+8	Laser preposition	5432	506	9	8	679	170
+8	Laser postposition	5432	2052	38	7	776	194
+4	Laser preposition	5636	5431	96	8	704	176
+4	Laser postposition	5703	5444	96	7	814	204
+2	Laser preposition	5908	5901	100	6	985	246
+2	Laser postposition	5364	5364	100	5	1073	268
0	Laser preposition	5771	5310	92	12	480	120
0	Laser postposition	5433	1380	25	11	493	124
-2	Laser preposition	5228	5092	97	10	523	131
-2	Laser postposition	5364	3879	72	7	766	192
-4	Laser preposition	5364	5297	99	14	383	96
-4	Laser postposition	5500	5123	93	8	687	172

$D_{LA}$  在  $0 \sim -4$  mm 之间时,随着  $D_{LA}$  的增大,电弧偏向激光作用点的时间比例增大,激光对电弧的吸引作用增强,电弧作用点的漂移概率减小,母材气化产生的金属蒸气对熔滴的阻碍作用减小,熔滴受到的电磁收缩力和斑点压力的方向更加稳定。这是因为随着  $D_{LA}$  的增大,照射到焊丝上的光斑直径

减小(正离焦时,焦点在工件上方),激光能量密度增大,提升了激光对电弧的引导作用。随着  $D_{LA}$  的增大,熔滴过渡频率先增大后减小, $D_{LA} = 0$  mm 时,激光作用在熔滴与焊丝端头之间,由于电弧和激光的双重作用,焊丝端头气化产生的金属和非金属蒸气有利于熔滴过渡; $D_{LA} = -4$  mm 时,激光作用在焊丝上的



光斑直径明显减小,激光的能量密度显著增大,焊丝气化产生的金属和非金属蒸气促进熔滴过渡。






从表 5 中还发现,激光前置时,熔滴的平均过渡周期短,电弧偏向激光作用点的时间比例大,说明激光前置比后置更有利于熔滴过渡和电弧稳定性的

提高。

其他工艺参数不变,激光前置、 $D_{LA} = +4$  mm 时,激光的加入促进了熔滴过渡,稳定了堆焊电弧,改善了焊道金属表面的铺展性(余高熔宽比越小,铺展性越好<sup>[22]</sup>),不同光丝位置下的焊道成形见表 6。

表 6 不同光丝位置的焊道成形

Table 6 Weld formation at different laser-arc positions

Surfacing heat source mode	Image of cross section of welding bead	Weld penetration $h$ /mm	Bead appearance parameter $Y$
Arc surfacing		1.90	0.24
Laser in front	Distance between laser and arc $D_{LA} = -2$ mm 	1.00	0.27
	Distance between laser and arc $D_{LA} = +4$ mm 	1.88	0.20
Laser behind	Distance between laser and arc $D_{LA} = -2$ mm 	1.20	0.28
	Distance between laser and arc $D_{LA} = +4$ mm 	3.20	0.25


3.4 激光功率对自保护药芯焊丝熔滴过渡的影响

电弧堆焊的熔滴过渡特征见表 7,可见电弧堆

焊时,熔滴过渡形式为排斥过渡,熔滴的平均过渡周期为 180 ms。

表 7 电弧堆焊的熔滴过渡特征

Table 7 Characteristics of droplet transition in arc surfacing

Parameter	Image of droplet transition	Mode of droplet transition	Average droplet transfer cycle $T$ /ms
Content		Repelled transfer	180

不同激光功率下复合堆焊的熔滴过渡特征见表 8。当  $D_{LA} = -2$  mm 时,可见激光的加入明显地缩短了熔滴过渡周期,激光功率  $P_L$  越大,熔滴过渡周期越短。 $P_L = 4$  kW 时,熔滴过渡周期只有电弧堆焊的 36%,熔滴过渡形式由排斥过渡转变为爆炸过渡。随  $P_L$  的增大,激光能量促使焊丝端头发生表面局部熔化和半熔熔化,熔滴在激光束下方,一方面激光提升了电弧空间温度,有利于熔滴表面张力的减小;另一方面焊丝表面气化产生的金属及非金属

蒸气有利于熔滴过渡, $P_L$  越大,效果越明显。

当  $D_{LA} = 0$  mm 时,激光的加入缩短了熔滴过渡周期,随  $P_L$  的增大,熔滴过渡周期先增大后减小,熔滴过渡形式由排斥过渡转变为爆炸过渡。复合堆焊时,激光功率的变化使焊丝端头发生表面局部熔化和半熔熔化,甚至发生全熔熔化。 $P_L = 1$  kW 时,焊丝端头发生表面局部熔化,熔滴在激光束下方,焊丝和熔滴表面气化产生的蒸气压力促进熔滴过渡; $P_L = 2$  kW 时,焊丝端头发生半熔熔化,熔滴在激光

束上方,母材气化产生的蒸气压力阻碍熔滴过渡;  
 $P_L=4\text{ kW}$  时,功率密度较大,焊丝端头发生全熔熔

化,焊丝和熔滴表面气化产生的蒸气压力大于母材  
 气化产生的蒸气压力,有利于熔滴过渡。

表 8 复合堆焊的熔滴过渡特征

Table 8 Characteristics of droplet transition in hybrid surfacing

Laser power $P_L/\text{kW}$	$D_{LA}=-2\text{ mm}$			$D_{LA}=0\text{ mm}$			$D_{LA}=+2\text{ mm}$		
	Image	Mode	$T/\text{ms}$	Image	Mode	$T/\text{ms}$	Image	Mode	$T/\text{ms}$
1.0		Repelled transfer	161		Repelled transfer	113		Repelled transfer	215
2.0		Repelled transfer	125		Repelled transfer	143		Repelled transfer	285
4.0		Explosive transfer	65		Explosive transfer	116		Repelled transfer	218

当  $D_{LA}=+2\text{ mm}$  时,激光的加入明显增加了熔滴过渡周期,随  $P_L$  的增大,熔滴过渡周期先增大后减小,熔滴过渡形式为排斥过渡。此时激光作用在母材上,母材气化产生的蒸气压力起主导作用,阻碍熔滴过渡,激光功率越大,熔滴过渡周期越长。当激光功率  $P_L=4.0\text{ kW}$  时,热辐射作用明显增强,起主导作用,有利于熔滴过渡。

### 3.5 自保护药芯焊丝激光-电弧复合堆焊的特点

自保护药芯焊丝与实芯焊丝因焊丝结构和气体保护方式不同,复合堆焊时,激光的加入对熔滴过渡的影响不同,主要体现在以下两方面。

1) 自保护药芯焊丝因药芯包在金属外皮里面,且药芯中含有质量分数为  $8\sim 11\%$  的造渣剂。电弧堆焊时,主要靠焊丝金属外皮导电,电弧和熔滴首先在金属外皮的个别部位形成,极易产生熔滴和电弧在焊丝端头旋转运动的现象,导致电弧稳定性下降。复合堆焊选择合适工艺参数时,激光通过照射、辐射和反射等作用在焊丝端头,改变了焊丝端头的熔化状态,减小了熔滴和电弧在焊丝端头旋转运动的概率,拉伸了电弧空间,为熔滴充分长大提供了足够空间,从而降低了熔滴发生短路过渡的概率,如图 21 所示。

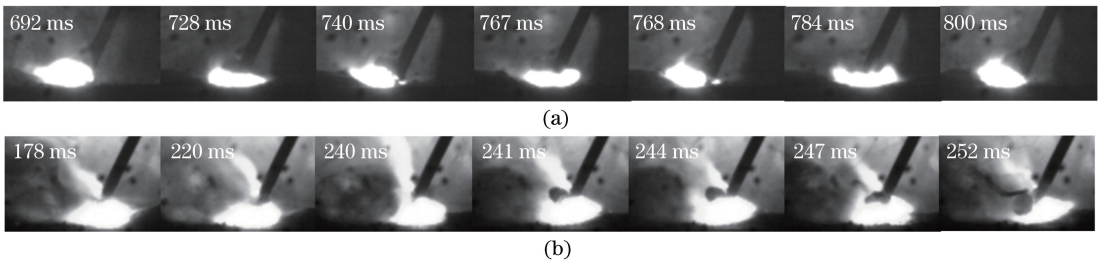


图 21 高速摄像图。(a)复合堆焊;(b)电弧堆焊

Fig. 21 High speed camera figures. (a) Hybrid surfacing; (b) arc surfacing

2) 实心焊丝复合堆焊时,激光的加入对电弧具有吸引作用,熔滴偏离焊丝轴线过渡,电弧弧根的面积大于熔滴的最大截面,电磁收缩力在焊丝轴线方向的分力减小,不利于熔滴过渡,且金属蒸气阻碍熔滴过渡,如图 22 所示;自保护药芯焊丝复合堆焊时,合适工艺参数有利于熔滴沿焊丝轴线过渡,电弧弧根的面积大于熔滴的最大截面,电磁收缩力促进熔滴过渡,且金属和非金属蒸气有利于熔滴过渡,如图

23 所示。

## 4 结 论

在复合堆焊下,光斑直径为  $2\text{ mm}$  时,熔滴过渡形式为细颗粒大角度排斥过渡,熔滴的平均过渡周期为  $53\text{ ms}$ ,堆焊过程最稳定。光丝间距为  $0\sim -4\text{ mm}$  时,激光前置比后置更有利于电弧稳定性的提高;光丝间距为  $+8\sim -4\text{ mm}$  时,激光前置更有

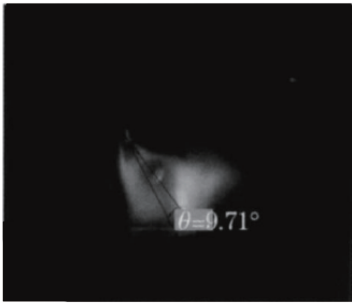


图 22 实芯焊丝复合堆焊的高速摄像图

Fig. 22 High speed camera figure of hybrid surfacing with solid wire

利于熔滴过渡。光丝夹角为  $30^\circ$  时,熔滴过渡形式为超细颗粒过渡,熔滴直径约为  $0.8\text{ mm}$ ;光丝夹角

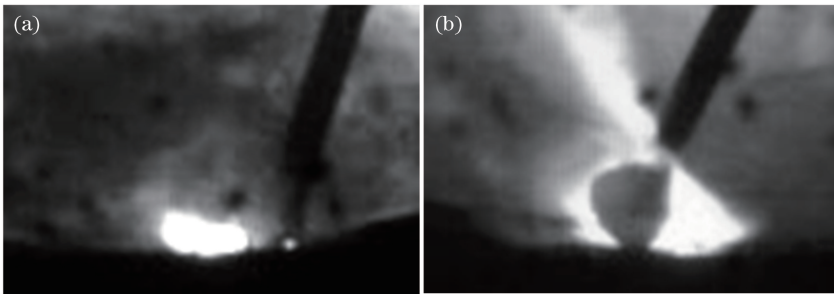


图 23 自保护药芯焊丝焊接的高速摄像图。(a)电弧堆焊;(b)复合堆焊

Fig. 23 High speed camera figures of surfacing with self-shielded flux-cored wire. (a) Arc surfacing; (b) hybrid surfacing

参 考 文 献

[1] Liu H Y, Li G D, Li Z X, *et al.* Observation and analysis of metal transfer of self-shielded flux cored wire for vertical down welding condition[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(8): 1212-1216.  
 刘海云, 李国栋, 栗卓新, 等. 自保护药芯焊丝立向下焊接熔滴过渡观察与分析[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(8): 1212-1216.

[2] Zhang T L, Li Z X, Jing H Y, *et al.* Analysis and evaluation of arc stability of self-shielded flux-cored wire in all-position welding [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2014, 35(8): 99-102.  
 张天理, 栗卓新, 荆洪阳, 等. 自保护药芯焊丝全位置焊接电弧稳定性分析与评价[J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 99-102.

[3] Li Z X, Huangfu P, Chen B G, *et al.* Control on the droplet transfer of self-shielded flux-cored wire [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(7): 108-112.  
 栗卓新, 皇甫平, 陈邦固, 等. 自保护药芯焊丝熔滴过渡的控制[J]. 机械工程学报, 2001, 37(7): 108-112.

为  $65^\circ$  时,熔滴过渡形式为细颗粒小角度排斥过渡,熔滴直径约为  $3.6\text{ mm}$ 。

与电弧堆焊相比,激光的加入改变了焊丝端头的熔化状态,减小了熔滴和电弧在焊丝端头旋转运动的概率,稳定了电磁收缩力方向,降低了熔滴的表面张力和熔滴短路过渡的概率。

自保护药芯焊丝激光-电弧复合堆焊最佳工艺参数条件为:激光前置,激光功率  $2\text{ kW}$ ,光丝间距  $+4\text{ mm}$ ,光斑直径为  $2\text{ mm}$ ,光丝夹角  $30^\circ$ 。该参数有利于熔滴过渡,堆焊电弧稳定,焊道金属表面的铺展性好。

自保护药芯焊丝激光-电弧复合堆焊为小型空心辊类的修复和再制造提供了一个新的思路。

[4] Zhang S H, Liu H Y, Wang Y, *et al.* Study on the characteristics of droplet transfer & spatter of self-shielded flux-cored wire [J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(7): 117-120.  
 张曙红, 刘海云, 王勇, 等. 自保护药芯焊丝熔滴过渡及飞溅分析[J]. 电焊机, 2014, 44(7): 117-120.

[5] Sun X, Wang H H, Zhang H Q, *et al.* Characters of droplet transfer and technology of typical flux-cored wire in domestic and overseas [J]. Welding & Joining, 2007(6): 7-10.  
 孙咸, 王红鸿, 张汉谦, 等. 国内外典型药芯焊丝的熔滴过渡及其工艺特性[J]. 焊接, 2007(6): 7-10.

[6] Lorenz S, Kannengiesser T, Posch G. Solid wire vs. flux cored wire-comparing investigations for GMA-laser-hybrid welding [C]. Design, Fabrication and Economy of Welded Structures, 2008: 477-484.

[7] Lorenz S, Kannengiesser T, Posch G. Suitability of high-alloyed flux-cored wire electrodes for laser-GMA hybrid welding [J]. Welding & Cutting, 2012, 64(3): 181-187.

[8] Wu Y M, Zhang C J, Hao J, *et al.* Study on process stability of 10CrNiMoV steel by hybrid laser-MAG (pulsed) welding [J]. Development and Application of Materials, 2014, 29(4): 20-24.  
 吴艳明, 张成杰, 郝剑, 等. 10CrNiMoV 钢激光-脉

- 冲 MAG 复合焊接稳定性研究[J]. 材料开发与应用, 2014, 29(4): 20-24.
- [9] Wu Y M, Wang W, Lin S Y, *et al.* Study of droplet transfer in Nd:YAG laser-arc(pulsed) hybrid welding [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2011, 32(7): 83-86.  
吴艳明, 王威, 林尚扬, 等. Nd:YAG 激光-脉冲 MAG 复合热源焊熔滴过渡分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(7): 83-86.
- [10] Ding X P, Li H, Yang L J, *et al.* Welding stability in laser+twin-electrode pulsed MAG hybrid welding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(22): 52-56.  
丁雪萍, 李桓, 杨立军, 等. 激光+双丝脉冲 MAG 复合焊的焊接稳定性[J]. 机械工程学报, 2012, 48(22): 52-56.
- [11] Liu F D, Zhang H, Du S F, *et al.* Influence of laser power on arc and droplet behaviors in droplets on CO<sub>2</sub> laser-MAG arc hybrid welding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(4): 75-82.  
刘凤德, 张宏, 杜劲峰, 等. 激光功率对 CO<sub>2</sub> 激光-MAG 电弧复合焊电弧与熔滴行为的影响[J]. 机械工程学报, 2013, 49(4): 75-82.
- [12] Zhang X F, Li H, Yang L J, *et al.* Effect of laser power on arc behavior and metal transfer in laser-twin-wire pulsed MIG hybrid welding process [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2014, 35(11): 23-26.  
张晓枫, 李桓, 杨立军, 等. 激光功率对激光-双丝脉冲 MIG 复合焊接电弧形态及熔滴过渡的影响[J]. 焊接学报, 2014, 35(11): 23-26.
- [13] Wei H L, Li H, Wang X Y, *et al.* Hybrid interaction of laser and pulsed MIG arc and its influence on metal transfer [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2011, 32(11): 41-44.  
韦辉亮, 李桓, 王旭友, 等. 激光-MIG 电弧的复合作用及对熔滴过渡的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(11): 41-44.
- [14] Xu C Y, Liu S Y, Zhang H, *et al.* Study on the characteristics and mechanics of droplet transfer in laser arc hybrid welding process [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(6): 154-161.  
徐春鹰, 刘双宇, 张宏, 等. 激光-电弧复合焊过程的熔滴过渡特征与受力分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(6): 154-161.
- [15] Niu K, Liu S Y, Liu F D, *et al.* The effect of welding parameters on weld appearance and stability in laser-arc welding [J]. Applied Laser, 2014, 34(1): 51-56.  
牛宽, 刘双宇, 刘凤德, 等. 激光-电弧复合焊接工艺参数对焊缝形貌及焊接稳定性的影响[J]. 应用激光, 2014, 34(1): 51-56.
- [16] Liu S Y, Zhang H, Shi Y, *et al.* Effects of process parameters on droplet transfer and bead shape in CO<sub>2</sub>-MAG hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(12): 3172-3179.  
刘双宇, 张宏, 石岩, 等. CO<sub>2</sub> 激光-MAG 电弧复合焊接工艺参数对熔滴过渡特征和焊缝形貌的影响[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3172-3179.
- [17] Hu L H, Huang J, Wu Y X, *et al.* Study on coupling mechanism and metal transfer in laser double-wire MIG arc hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0602005.  
胡连海, 黄坚, 吴毅雄, 等. 激光-双 MIG 电弧复合焊耦合机制及熔滴过渡研究[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0602005.
- [18] He S, Chen H, Chen Y, *et al.* Effect of laser power to droplet transfer of laser-MAG hybrid welding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021408.  
何双, 陈辉, 陈勇, 等. 激光功率对激光-MAG 复合焊熔滴行为的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021408.
- [19] Li M, Zhang W, Hua X M, *et al.* Investigation of plasma and metal transfer dynamic behavior during fiber laser GMAW-P hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402008.  
李敏, 张旺, 华学明, 等. 光纤激光与 GMAW-P 复合焊接等离子体及熔滴过渡动态特征研究[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402008.
- [20] Wang B, Song Y L. Welding arc phenomenon and welding materials technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 213-214.  
王宝, 宋永伦. 焊接电弧现象与堆焊材料工艺性 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 213-214.
- [21] Zhu Y L, Li H, Xiang T, *et al.* Study on the arc characteristic and metal transfer in laser-MIG double wires hybrid welding [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(2): 33-40.  
朱艳丽, 李桓, 向婷, 等. 激光-MIG 双丝复合焊电弧特性与熔滴过渡研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(2): 33-40.
- [22] Qin G L, Lei Z, Wang X Y, *et al.* Influences of Nd:YAG laser + pulsed MAG arc hybrid welding parameters on its weld appearance [J]. Applied Laser, 2006, 26(2): 97-100.  
秦国梁, 雷振, 王旭友, 等. Nd:YAG 激光+脉冲 MAG 电弧复合热源焊规范参数对焊缝表面成形的影响[J]. 应用激光, 2006, 26(2): 97-100.